

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 2.1 แอปเปิล

แอปเปิล (*Malus domestica*) เป็นผลไม้ในตระกูล Rosaceae แอปเปิลเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานมากที่สุดชนิดหนึ่งในโลก เป็นไม้ผลเมืองหนาว มีต้นกำเนิดในบริเวณประเทศอิหร่านในปัจจุบัน จากนั้นจึงกระจายพันธุ์ไปยังเทือกเขาคอเคซัส และลุ่มแม่น้ำไทกริส-ยูเฟรติส แล้วแพร่หลายต่อไปทั่วโลก ในประเทศไทยปลูกได้ในพื้นที่ภาคเหนือ เช่น ที่ดอยอ่างขาง จะเริ่มออกดอกประมาณเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ และจะเริ่มเก็บผลได้ประมาณต้นเดือนมิถุนายน

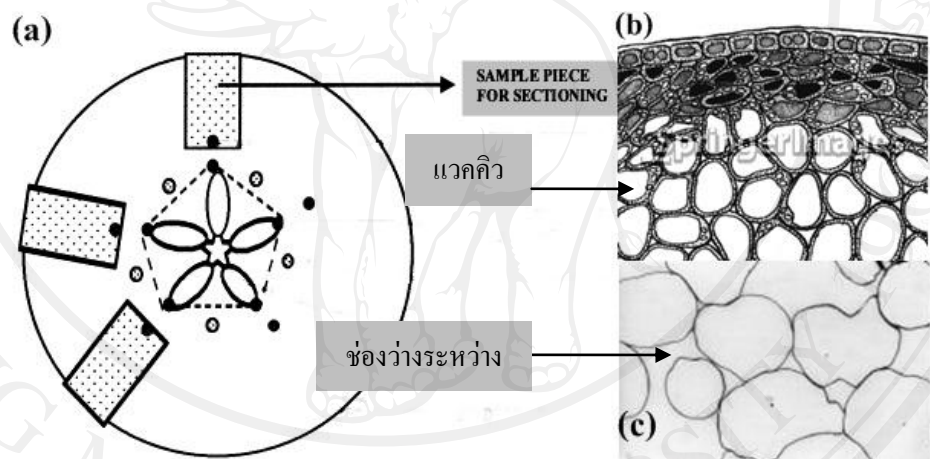
ต้นแอปเปิลจะสูงประมาณ 5 ถึง 12 เมตร เป็นไม้เนื้อแข็ง ใบเป็นใบเดี่ยวเขียวสลับกันและขอบเป็นหยัก ดอกออกเป็นกลุ่มสีขาวอมชมพู โดยทั่วไปต้นแอปเปิลมีรูปร่างเกือบเป็นทรงกลม แต่บางพันธุ์ก็มีลักษณะสูงชะลูด บางพันธุ์ก็มีลักษณะเป็นพุ่มแฉ่ ผลคล้ายชมพู่มีรอยเป็นนูนทางด้านข้างและก้นผล ผลแอปเปิลมีเปลือกบาง สีแดง เขียว และเหลืองตามสายพันธุ์ เนื้อในเป็นเหมือนทรายละเอียดสีเหลืองนวล เมล็ดมีขนาดเล็กสีดำ แอปเปิลเป็นผลไม้เมืองหนาวชอบอากาศหนาวเย็น อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 16 ถึง 29 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า -7 องศาเซลเซียส จะเป็นอันตรายต่อระบบรากอย่างรุนแรง สำหรับดินที่เหมาะสมกับการปลูกแอปเปิลควรเป็นดินร่วนปนทรายมีความเป็นพีเอชประมาณ 5.0 ถึง 6.8

ผลแอปเปิลจัดอยู่ผลไม้ประเภทผลสด เปลือกบาง มีเปลือกผลกับเนื้อเชื่อมติดอยู่ด้านนอก และผลพัฒนามาจากรังไข่เชิงประกอบชนิดอยู่ต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของดอกที่อยู่ภายในหลอดดอกขนาดใหญ่ การจัดวางตัวของออวูลินรังไข่เป็นแบบพลาเซนตารอบแกนร่วม (axile placentation) ดังนั้น เมล็ดที่อยู่ในผลจึงชี้ปลายออกด้านนอก เนื้อแอปเปิลที่รับประทานเป็นส่วนพัฒนามาจากฐานดอกรูปถ้วย (hypanthium) ในขณะที่ใจกลางผล คือส่วนของผลที่แท้จริง (ภาพ 2.1 และ 2.2) ผลแบบนี้มีคาร์เพลจำนวน 5 คาร์เพล



ภาพ 2.1 แสดงการตัดขวางผลแอปเปิลสด พันธุ์ฟูจิ

ที่มา : ตัดแปลงจาก กิตติ (2555)



ภาพ 2.2 แสดงลักษณะสรีรวิทยาของผลแอปเปิลสดตัดขวาง (a) พิจารณาในช่องสี่เหลี่ยมเป็นส่วนเนื้อของแอปเปิล ประกอบด้วย (b) (จากภายนอกไปภายใน) เปลือก ผิวชั้นนอกเนื้อเชื้อ และในส่วนของแวคคิวโอล ( $\times 500$ ) มีลักษณะของเซลล์จัดเรียงตัวติดกัน และช่องว่างระหว่างเซลล์มีน้อย (c) เมื่อผลแอปเปิลแก่ยิ่งขึ้น จะเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์เพิ่มมากขึ้น ( $\times 120$ )

ที่มา : ตัดแปลงจาก Solovchenko and Buzulukova

ตาราง 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของแอปเปิลต่อส่วนที่บริโภคได้ต่อ 100 กรัม

คุณค่าทางโภชนาการ	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	13.810
- น้ำตาล	10.390
- เส้นใย	2.400
ไขมัน	0.170
โปรตีน	0.260
น้ำ	85.560
วิตามินเอ	$3.000 \times 10^{-6}$
วิตามินบี 1	$0.017 \times 10^{-3}$
วิตามินบี 2	$0.026 \times 10^{-3}$
ไนอะซิน	$0.091 \times 10^{-3}$
วิตามินบี 5	$0.061 \times 10^{-3}$
วิตามินบี 6	$0.041 \times 10^{-3}$
วิตามินบี 9	$3.000 \times 10^{-6}$
วิตามินซี	$4.600 \times 10^{-3}$
แคลเซียม	0.006
เหล็ก	$0.120 \times 10^{-3}$
ฟอสฟอรัส	0.011
โพแทสเซียม	0.107
สังกะสี	$0.040 \times 10^{-3}$

ที่มา : ดัดแปลงจาก USDA (2010)

แอปเปิลมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (ตาราง 2.1) นอกจากจะสามารถนำมารับประทานเป็นผลไม้สดแล้วยังสามารถนำแอปเปิลมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ได้อีกหลากหลาย เช่น แยม เยลลี่ น้ำผลไม้ ผลไม้กระป๋อง และผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง เป็นต้น

## 2.2 ออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration)

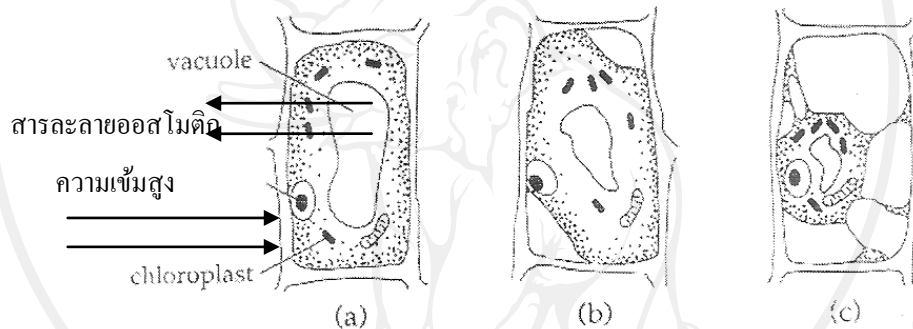
ออสโมติกดีไฮเดรชันเป็นการทำแห้งโดยอาศัยหลักการออสโมซิส เป็นการดึงน้ำบางส่วนออกจากอาหาร โดยการแช่ชิ้นอาหารลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง (hypertonic solution) หรือสารละลายที่มีค่าแอสโมติกพี (a<sub>w</sub>) ต่ำกว่าอาหาร ทำให้เกิดการออสโมซิสขึ้นทันทีเพราะความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์และสารละลายภายนอกเกิดเป็นแรงขับเคลื่อน ทำให้มีการถ่ายเทมวลระหว่างอาหารและสารละลายภายนอก น้ำที่อยู่ภายในอาหารจะซึมผ่านผนังเซลล์และเชื่อมุมเซลล์ออกมาในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ขณะเดียวกันตัวถูกละลายในสารละลายจะซึมผ่านผนังเซลล์เข้าไป การแพร่ของน้ำจากภายในอาหารและตัวถูกละลายในสารละลายเข้มข้นภายนอกเกิดขึ้นพร้อมกันแต่ในทิศทางตรงกันข้าม และกระบวนการนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ปริมาณน้ำในอาหารจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงแรก เพราะมีความแตกต่างของแรงดันออสโมติกอย่างมาก และอาหารมีความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลไม่มาก ส่วนช่วงเวลา 2 ถึง 6 ชั่วโมงต่อมาการแพร่ของน้ำจะลดลง อัตราการแพร่ของตัวถูกละลายเข้าไปในเนื้อเยื่อของอาหารช้ากว่าการแพร่ของน้ำ จึงทำให้ตัวถูกละลายส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณผิวหนังของชิ้นอาหาร การออสโมซิสจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งสารละลายเจือจางลง อัตราการถ่ายเทมวลลดลงและระบบปรับเข้าสู่สมดุล วิธีนี้ทำให้ชิ้นอาหารเปลี่ยนแปลงปริมาตรและหดรตัว มวลของตัวถูกละลายในชิ้นอาหารเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการทำออสโมติกดีไฮเดรชันควรจะสั้น คือ ให้น้ำที่ถูกกำจัดออกมากที่สุด โดยให้มีการดูดซึมตัวถูกละลายได้น้อยที่สุด (รัตนและพิไลรัก, 2541)

ออสโมซิส เป็นการแพร่ของตัวทำละลายผ่านเมมเบรนที่มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (differentially permeable membrane) โดยเมมเบรนนี้ยอมให้ตัวถูกละลายและตัวทำละลายบางชนิดผ่าน การแพร่ของไอออนหรือโมเลกุลของสารจากภายนอกเข้าสู่เซลล์หรือจากภายในเซลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยอิสระ เนื่องจากมีเมมเบรนเป็นตัวขวางกั้นการเคลื่อนที่ของน้ำหรือตัวทำละลายผ่านเมมเบรนจากค่าพลังงานอิสระหรือแอสโมติกพีของโพเทนเชียลสูงไปยังที่มีค่าพลังงานอิสระหรือแอสโมติกพีของโพเทนเชียลต่ำกว่านี้ เรียกว่า ออสโมซิส (สมบุญ, 2548) และน้ำบริสุทธิ์มีค่าแอสโมติกพีของโพเทนเชียลสูงที่สุดเท่ากับศูนย์ เมื่อมีตัวถูกละลายปนอยู่ในน้ำ ค่าแอสโมติกพีของโพเทนเชียลจะลดลงเนื่องจากมีตัวถูกละลายปนอยู่ เรียกว่า ออสโมติกโพเทนเชียล (osmotic potential,  $\Phi_{\pi}$ ) (สมบุญ, 2548)

ในเซลล์พืชซึ่งเกิดปรากฏการณ์ของน้ำไหลเข้าเซลล์แบบออสโมซิส จะเกิดแรงดันภายในเซลล์ดันออกข้างนอกทำให้เซลล์เต่ง เรียกว่า แรงดันเต่ง (turgor pressure) แต่ผนังเซลล์จะเกิด

แรงดันในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันเต่ง เรียกว่า แรงดันจากผนังเซลล์ เป็นแรงดันที่เกิดในทิศทางที่บีบน้ำออกจากเซลล์ทำให้เซลล์พืชไม่แตกออกออสโมซิสจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงจุดสมดุล คือค่าออสโมติกโพเทนเชียลทั้งภายในและภายนอกเท่ากัน ซึ่งค่าแรงดันเต่งจะเท่ากับค่าแรงดึงจากผนังเซลล์ แรงดันทั้งสองนี้จะช่วยทำให้เซลล์มีรูปร่างที่แน่นอน

ถ้านำเซลล์ไปใส่ลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เช่น น้ำเกลือ หรือน้ำเชื่อม น้ำจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์พืช (ภาพ 2.3 (a), (b) และ (c)) ทำให้เซลล์เกิดการสูญเสียน้ำ แวกคิวโอลมีขนาดเล็กลง โพรโทพลาสต์จะหดตัวจากผนังเซลล์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า พลาสโมไลซิส (สมบุญ, 2548) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นตามลำดับ



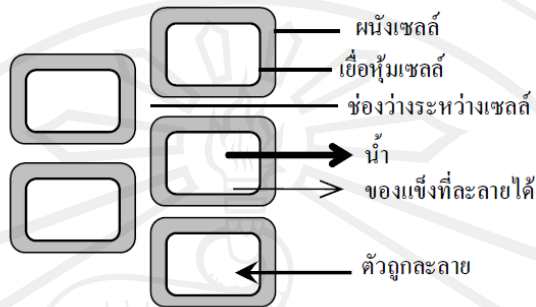
ภาพ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเซลล์พืชในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง

ที่มา : ดัดแปลงจาก ปวีณา (2550)

### 2.2.1 สารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติก เป็นสารเพื่อเพิ่มแรงดันออสโมติกให้แก่สารละลาย สารละลายออสโมติกจะต้องมีค่า  $a_w$  ต่ำ เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค มีรสชาติเป็นที่ยอมรับ (รัตนและพิไลรัก, 2541) ไม่มีพิษ ไม่ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของอาหาร และมีคุณสมบัติในการเพิ่มแรงดันออสโมติกอย่างสูง ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมาก แรงดันออสโมติกจะมากตามด้วย แรงดันออสโมติกเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมความสมดุล ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่จากความเข้มข้นของสารละลายต่ำ (มีน้ำมาก) ในเซลล์ออกสู่สารละลายที่มีความเข้มข้นที่สูงกว่า (มีน้ำน้อยกว่า) โดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (ภาพ 2.4 ) โดยทั่วไปสารออสโมติกที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำตาลซูโครส แลกโทส กลูโคส ฟรักโทส มอลโตเดกซ์ทริน และ corn syrup นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล เกลือ

โซเดียมคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม การใช้เกลือจะไม่ใช่ที่ยอมรับด้านรสชาติ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีรสเค็มมากเกินไป



ภาพ 2.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำ และสารละลายภายในเซลล์ เมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Lazarides (2001)

สารละลายน้ำตาลจัดเป็นสารละลายออสโมติกที่นิยมใช้มากที่สุดในการกำจัดน้ำออกจากผลไม้ โดยชนิดของน้ำตาลที่นิยมมากที่สุด คือ น้ำตาลซูโครส อาจมีการใช้น้ำตาลกลูโคสและฟรักโทสบ้าง ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำไม่มีความแตกต่างกัน บางครั้งอาจใช้สารละลายหลายชนิดร่วมกัน เช่น ในการทำแอปเปิลอบแห้ง มีการใช้น้ำตาลซูโครส 52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับฟรักโทส 42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มอลโทส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โพลีแซกคาไรด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเกลือ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่า เกลือโซเดียมคลอไรด์ กรดมาลิก กรดแลกติก และกรดไฮโดรคลอริก ที่ระดับความเข้มข้น 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร่วมกับการใช้น้ำตาลซูโครส สามารถปรับปรุงการทำแห้งแบบออสโมติกได้โดยกำจัดน้ำออกจากเซลล์ได้เร็วขึ้น และการใช้แคลเซียมคลอไรด์และกรดมาลิกร่วมกับน้ำตาลซูโครส สามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของแอปเปิลอบแห้งได้ด้วย (Mujumdar, 1995)

การใช้สารลดค่า  $a_w$  ร่วมกับสารละลายซูโครสในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก ซึ่งกลีเซอรอลจัดเป็นสารลด  $a_w$  ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอาหาร กานตันลิน และคณะ (2548) พบว่า ผู้บริโภคให้ความชอบความชอบของผลไม้ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกในสารละลายกลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มากกว่าผลไม้ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกในสารละลายซูโครส เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นและลด  $a_w$  โดยการสร้าง

พันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำอิสระ (นิราศ, 2546) นอกจากนี้สารละลาย  $a_w$  ยังมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และยังสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เร่งด้วยเอนไซม์ (ไพโรจน์, 2539) อีกปัญหาหนึ่งที่พบในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก คือการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ เนื่องจากการออสโมซิสเป็นเวลานาน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการลดเวลาในการออสโมซิส การเพิ่มอุณหภูมิ และการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Khin *et al.* (2007) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 55 องศาเซลเซียส และการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซูโครสจากร้อยละ 45 เป็นร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มอัตราการสูญเสียน้ำได้ แต่เนื่องจากผลไม้ที่ผ่านการออสโมซิสสามารถลดปริมาณน้ำลงได้เพียงประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักเริ่มต้นหรือมีค่า  $a_w$  ประมาณ 0.65 ซึ่งจุลินทรีย์ยังสามารถเจริญได้ (จุฑามาศ, 2542)

ชนิดของสารละลายออสโมติกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก Azoubel and Murr (2004) พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียมีค่ามากกว่าการใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมคลอไรด์กับซูโครส นอกจากนี้ นิราศ (2546) พบว่าปริมาณน้ำที่สูญเสียมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกลีเซอรอลสูงขึ้นในการใช้สารละลายผสมระหว่างซูโครสกับกลีเซอรอลในการออสโมซิสสับประรด

ในระหว่างการทำแห้งแบบออสโมติก หากเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายที่แห้งสูงเกิน 70 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการสูญเสียน้ำและการซึมผ่านของตัวถูกละลายเข้าไปในเนื้อผลไม้เพิ่มขึ้นด้วย (รัตนาและพิไลรัก, 2541) สอดคล้องกับการทดลองของ Lazarides (1995) ที่ได้ศึกษาการถ่ายเทมวลระหว่างการออสโมซิสในแอปเปิล โดยแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 45 ถึง 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ระดับอุณหภูมิ 20 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นมากขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น จะมีอัตราการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และมีอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียน้ำต่อของแข็งที่เพิ่มขึ้นลดลง แต่การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น การใช้อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ในการทำแห้งแอปเปิลโดยวิธีออสโมซิส ทำให้เกิดสีน้ำตาล และเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นและรสชาติ (Fito *et al.*, 1999)

## 2.2.2 ข้อดีของการทำแห้งแบบออสโมติก (รัตนาและพิไลรัก, 2541)

- ก. เมื่อนำผลไม้มาผ่านกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกก่อนนำไปการทำแห้งด้วยลมร้อน จะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งและช่วยประหยัดพลังงาน

- ข. ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่ผลไม้ระหว่างการทำแห้งแบบออสโมติก สูงมากจนทำให้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในผลไม้ทำงานช้าลง เป็นผลให้สีของผลไม้ไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- ค. ผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งแบบออสโมติกเป็นการทำแห้งโดยไม่ใช้อุณหภูมิสูง เป็นผลให้กลิ่นของผักและผลไม้คงอยู่มากกว่า

### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งแบบออสโมติก

#### ก. อุณหภูมิ

ระหว่างการทำแห้งแบบออสโมติก หากอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่สูงขึ้นไปประมาณ 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการออสโมซิสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการสูญเสียน้ำของชิ้นผลไม้เพิ่มขึ้น หากอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกสูงเกิน 70 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการสูญเสียน้ำและการซึมผ่านของตัวถูกละลายเข้าไปในผลไม้เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เพราะความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้

#### ข. การกวนหรือการคน

การกวนหรือการคนสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่ระหว่างการทำแห้งแบบออสโมติกเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่ให้มีความสม่ำเสมอเท่ากันทั้งหมด โดยเฉพาะบริเวณรอบๆ ชิ้นผลไม้ อัตราการออสโมซิสของสารละลายออสโมติกที่มีการคนตลอดเวลาจะเร็วกว่าของสารละลายออสโมติกที่ไม่ได้คน

#### ค. อัตราส่วนของผลไม้กับสารละลายออสโมติก

อัตราส่วนของผลไม้กับสารละลายออสโมติกมีผลต่ออัตราการออสโมซิส เพราะหากอัตราส่วนของผลไม้ต่อสารละลายออสโมติกน้อยเกินไป จะมีผลให้ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกเจือจางลง และทำให้แรงดันออสโมติกลดลงด้วย

#### ง. ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติกควรมีความเข้มข้นสูง เพราะความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก ยิ่งสูง อัตราการสูญเสียน้ำยิ่งเพิ่มขึ้นและอัตราการแพร่เข้าของตัวถูกละลายยิ่งลดลง นอกจากความเข้มข้นแล้วยังพบว่า สารละลายออสโมติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารละลายซูโครส จะลดการแพร่ของตัวถูกละลายและเพิ่มการสูญเสียน้ำด้วย



#### จ. ชนิดของอาหาร ผัก ผลไม้ พันธุ์ ระดับความแก่

ผัก ผลไม้ หรืออาหารที่ต่างชนิดกัน รวมไปถึงผลไม้พันธุ์เดียวกันแต่ระดับความสุกแก่แตกต่างกัน จะมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน จากหลักการออสโมซิส การถ่ายเทมวลที่เกี่ยวข้องจะอยู่ในรูปของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณน้ำที่อยู่ภายในอาหาร เมื่ออาหารมีองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวแตกต่างกัน จะส่งผลให้ค่าความดันออสโมติกระหว่างชั้นอาหารแต่ละชนิดกับสารละลายออสโมติกแตกต่างกัน เมื่อใช้สารละลายออสโมติกต่างชนิดและความเข้มข้นเดียวกัน (Lazarides *et al.*, 1997) เปรียบเทียบการถ่ายเทมวลของแอปเปิลและฟักทอง ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่า สามารถดึงน้ำออกจากฟักทองได้มากที่สุดและมีปริมาณของแข็งซึมเข้าเนื้อฟักทองน้อยที่สุด ส่วนแอปเปิลมีการถ่ายเทมวลต่ำที่สุด (Kowalska *et al.*, 2001)

#### ง. ระดับการเคลื่อนที่ของสารละลาย

การถ่ายเทมวลภายใต้หลักการทำแห้งแบบออสโมติกสามารถเกิดขึ้นได้ เพียงนำชั้นอาหารแช่หรือสัมผัสกับสารละลายออสโมติกเข้มข้นภายใต้อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยปราศจากการให้แรงใดๆ กับชั้นอาหาร ซึ่งการถ่ายเทมวลภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวเป็นไปได้ช้า ต้องใช้ระยะเวลาานาน เนื่องจากในระหว่างกระบวนการดึงน้ำออกจากชั้นอาหาร ความเข้มข้นของสารละลายรอบๆ ชั้นอาหารลดลง เกิดเป็นชั้นบางๆ อยู่รอบชั้นอาหาร ส่งผลให้ค่าแรงดันออสโมติก ระหว่างชั้นอาหารกับสารละลายลดลง อัตราการถ่ายเทมวลจึงลดลง หรือหากใช้สารละลายน้ำตาลที่มีค่าความเข้มข้นสูงในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก จะส่งผลให้เกิดการตกผลึกน้ำตาลที่บริเวณผิวหน้าของชั้นอาหาร ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ภายในและการเคลื่อนที่ของของแข็งจากสารละลายเข้าสู่ชั้นอาหาร อัตราการถ่ายเทมวลจึงลดลง อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทมวลสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการให้แรงกับชั้นอาหารหรือสารละลายเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ และลดแรงต้านทานภายนอกที่อยู่บริเวณรอบผิวของชั้นอาหาร แรงต้านนี้เกิดจากการที่น้ำเคลื่อนที่ออกจากชั้นอาหารดังกล่าวข้างต้น โดยระดับการเคลื่อนที่ของชั้นอาหารต้องมากเพียงพอที่จะทำลายชั้นบางๆ ที่อยู่รอบชั้นอาหารนั้นได้ (Azura *et al.*, 1996; Rastogi *et al.*, 1994) อัตราการดึงน้ำออกจะเพิ่มขึ้นตามระดับการเคลื่อนที่ของสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยชั้นอาหารที่แช่อยู่ในสารละลายออสโมติกที่มีการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าการเคลื่อนที่แบบราบเรียบ Moreira and Sereno (2003) ศึกษาผลของการเคลื่อนที่ของสารละลายในช่วงการไหลแบบราบเรียบ พบว่าอัตราการสูญเสียน้ำของแอปเปิลเพิ่มตามการเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้น

การเคลื่อนที่ของสารละลายออสโมติก ส่วนการเพิ่มปริมาณของแข็งไม่พบความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกภายใต้สภาวะสารละลายออสโมติกอยู่กับที่

จ. กระบวนการเบื้องต้นก่อนกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก

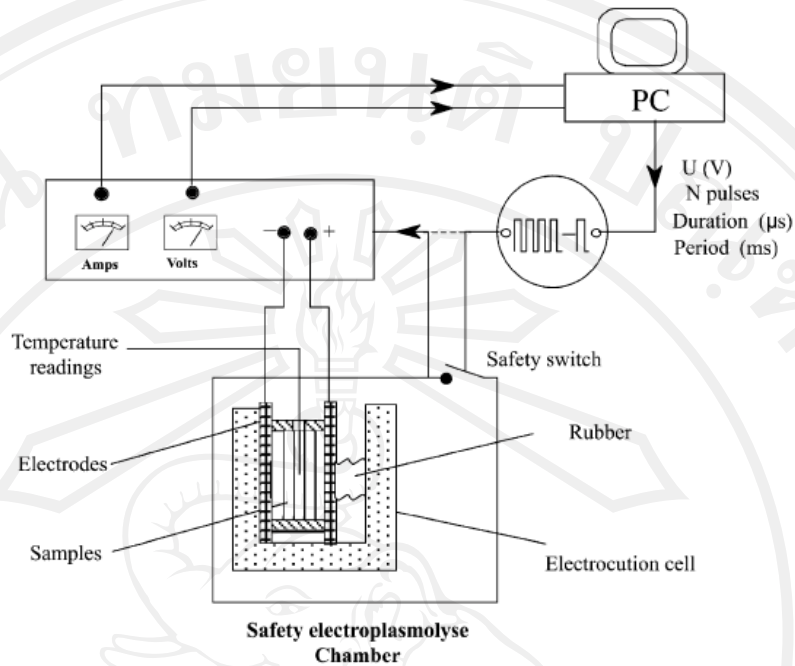
กระบวนการเริ่มต้นก่อนการเริ่มกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก ล้วนมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล เช่น การลวก การใช้ความดันสูง และการใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ

- การลวก การลวกอาหารจะทำให้เกิดการแยกตัวของเซลล์ ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลผ่านเซลล์ของชิ้นอาหารได้ง่าย อัตราการถ่ายเทมวลจึงมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นอาหารที่ไม่ผ่านการลวก อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวทำให้เนื้อสัมผัสของอาหารนุ่ม
- การใช้ความดันสูง การประยุกต์ใช้ความดันสูง (ความดันในช่วง 100 ถึง 800 เมกะปาสคาล) ในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลได้ โดยความดันทำให้เซลล์ต่างๆ ในชิ้นอาหารไม่รวมติดเป็นชั้นเดียวกัน การเคลื่อนที่ของน้ำและของแข็งจึงผ่านผนังเซลล์ได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปการใช้ความดันสูงจะใช้ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก ทิพสุดา และคณะ (2550) ได้ศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกที่มีต่อคุณภาพของสตรอเบอรี่อบแห้ง โดยใช้ความดันสูงในช่วงแรกของกระบวนการ พบว่าเมื่อใช้ความดัน 10 กิโลปาสคาลในช่วงแรกของกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกภายใต้สุญญากาศเป็นเวลา 10 นาที ส่งผลทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และสามารถลดระยะเวลาการออสโมซิสของผลสตรอเบอรี่ลงได้ การทำแห้งแบบออสโมติกที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของผลสตรอเบอรี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

### 2.3 การใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ (pulsed electric field, PEF)

การใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ เป็นเทคนิคการให้กระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าสูงลักษณะเป็นจังหวะ (pulse) กับอาหาร โดยผ่านขั้วอิเล็กโทรดในช่วงเวลาสั้นจัดเป็นวิธีการแปรรูปอาหารแบบไม่ใช้ความร้อน (non-thermal processing) ซึ่งสามารถดำเนินการได้ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ โดยหลักการการทำงานของ PEF คือ การให้สนามไฟฟ้าผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอาหาร เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่เชื่อมหุ้มเซลล์ เมื่อมีการสะสมประจุไฟฟ้าที่

เยื่อหุ้มเซลล์จนทำให้มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤติที่จะทำให้เกิดการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งจะใช้เวลาสั้นมาก ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “electroporation” หรือ “pore formation” คือ เยื่อหุ้มเซลล์เกิดการแตกเป็นรู ส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์มีลักษณะการเป็นเยื่อเลือกผ่านเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ irreversible electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤติอย่างมาก จนทำให้เกิดการทำลายที่เยื่อหุ้มเซลล์อย่างถาวรเกิดเป็นรูขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เป็นการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อการถนอมอาหารได้ และ reversible electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์จากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่ความเข้มสูงกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤติเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูขนาดเล็ก ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลเข้าออกผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เท่านั้น โดยเซลล์ไม่ถูกทำลายหรือเสียหายมาก ซึ่งสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กับการเตรียมชิ้นต้นก่อนการดองน้ำออกโดยวิธีออสโมซิสได้ (Angersbach *et al.*, 1999; Barbosacanos *et al.*, 2001) มีผู้วิจัยนำเทคนิค PEF มาใช้ในการเตรียมพริกหยวกชิ้นต้นก่อนการทำแห้งแบบออสโมติก พบว่า พริกหยวกที่ผ่านการเตรียมชิ้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงกว่าการใช้ความร้อน การแช่เยือกแข็งและมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น และการเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าทำให้ค่าดัชนีการแตกของเนื้อเยื่อหุ้มเซลล์ (cell disintegration index,  $Z_p$ ) ของชิ้นพริกหยวกเพิ่มขึ้น ทำให้พริกหยวกมีค่าปริมาณการสูญเสียน้ำสูงขึ้น (Ade-Omowaye *et al.*, 2002;2003) และใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมชิ้นแครอท (Rastogi *et al.*, 1999; Amami *et al.*, 2007) แอปเปิล (Amami *et al.*, 2006) และมะม่วง (Tedjo *et al.*, 2002) ก่อนการดองน้ำออกโดยวิธีออสโมซิส พบว่า การเตรียมชิ้นต้นด้วยเทคนิค PEF ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างการดองน้ำออกโดยวิธีออสโมซิส คือ ตัวอย่างมีค่าร้อยละของปริมาณน้ำที่สูญเสียและร้อยละของปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น



ภาพ 2.5 อุปกรณ์การใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Abdel and Eugene (2002)

ซึ่งอุปกรณ์ของสนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ ดังแสดงในภาพ 2.5 ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1500 โวลต์ และ 20 แอมแปร์ ในส่วนของ safety electropulsation chamber ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับตัวอย่าง ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้า ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องส่งกระแสไฟฟ้า ระบบนี้จะระบุจำนวน pulses ที่ใช้ และ pulse duration และวัดค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะที่มีประสิทธิภาพระหว่างการเตรียมตัวอย่าง มีการนำอุปกรณ์ของสนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะไปใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกอย่างแพร่หลาย

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำ PEF มาใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ได้แก่ Amami *et al.* (2005; 2006) ได้ประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ ที่ 0.90 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และ 750 pulses ในช่วง 100 ไมโครวินาที เตรียมแอปเปิ้ลก่อนการแช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 44.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นและปริมาณของแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Taiwo *et al.* (2001; 2002) ใช้ PEF ก่อนการทำแห้งแบบออสโมติก พบว่า สามารถรักษาหรือคงสภาพวิตามินซีในแอปเปิ้ลได้ดีที่สุด และอัตราการคูดน้ำกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

พิมพ์ใจ และวิชมณี (2552) กล่าวว่า ผลของการใช้ PEF ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นมะพร้าวขั้นต้น ก่อนการทำแห้งแบบออสโมติกต่ออัตราการถ่ายเทมวล พบว่า ปริมาณการสูญเสียน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้แช่เพิ่มขึ้น โดยการใช้ PEF แบบใช้เวลานาน (long time) มีปริมาณการสูญเสียน้ำสูงกว่าการใช้ PEF แบบใช้เวลาน้อย (short time) โดยที่สภาวะการใช้ PEF แบบใช้เวลานาน 15 นาที จะช่วยเพิ่มปริมาณการสูญเสียน้ำได้ในช่วง 1 ถึง 4 ชั่วโมง แต่การใช้ PEF ทำให้ค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าเป็นลบในช่วง 1 ถึง 6 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส ซึ่งเกิดจากการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ของเนื้อเยื่อที่ผิวหน้าของชิ้นมะพร้าว เป็นการแตกออกแบบไม่ผันกลับ จึงเกิดการสูญเสียของแข็งภายในเนื้อเยื่อมะพร้าวในระหว่างการออสโมซิส สำหรับผลของการใช้ PEF ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นมะพร้าวขั้นต้นก่อนการทำแห้งแบบออสโมติกต่อค่าดัชนีการแตกของเนื้อเยื่อหุ้มเซลล์ พบว่า การใช้ PEF ที่ระยะเวลานานทำให้ค่า  $Z_p$  มีค่าสูงขึ้น โดยการใช้ PEF แบบใช้เวลาน้อยจะมีค่า  $Z_p$  ที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่าการใช้ PEF แบบใช้เวลานาน

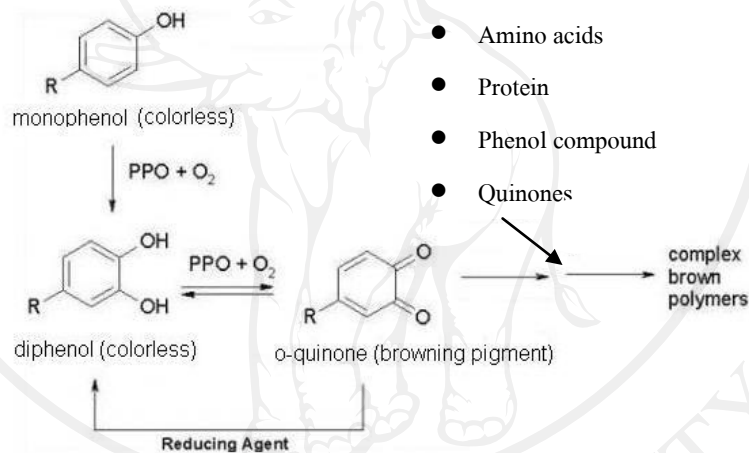
ดังนั้นการใช้ PEF ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น จากการกล่าวข้างต้นจึงมีการประยุกต์ใช้งานโดยการใช้ PEF ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.22 ถึง 1.60 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความเข้มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้กับชนิดอาหารแตกต่างกันไป ซึ่งกระตุ้นในช่วงเวลา 0.01 ถึง 0.1 วินาที ในช่วงความเข้มของสนามไฟฟ้าดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผนังเซลล์ของผักและผลไม้ (Bouzzara *et al.*, 2000) แต่ปัญหาหนึ่งของการนำสนามไฟฟ้าความเข้มสูงมาใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติกเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลของแอปเปิ้ลคือการเกิดสีน้ำตาล เนื่องจากเอนไซม์ PPO จึงต้องมีการลดการเกิดน้ำตาล ในผักและผลไม้มีการเติมสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิก

#### 2.4 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545)

อาหารและผลิตภัณฑ์อาหารมากมายหลายชนิดมีปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ และปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง ที่เกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลมีทั้งผลดีและผลเสียต่อคุณภาพอาหาร

### 2.4.1 ปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction)

ปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชเมื่อเซลล์ถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือก หรือการหั่นชิ้น ทำให้เกิดปฏิริยาของสารประกอบโมโนฟีนอล (สารไม่มีสี) ที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสออกซิเจนในอากาศมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) เป็นตัวเร่ง ทำให้เกิดปฏิริยาไฮดรอกซีเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (*o*-diphenol) สารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นออร์โท-ควิโนน (*o*-quinone) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล และเป็นปฏิริยาผันกลับไปเป็นไดฟีนอลได้ (สารไม่มีสี) ควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้สามารถรวมตัวกันและทำปฏิริยาต่อกับกรดอะมิโน หรือโปรตีน หรือกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล ดังแสดงในภาพ 2.6



ภาพ 2.6 ปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO

ที่มา: คัดแปลงจาก Sapers (1993)

สับสเตรตที่ถูกออกซิไดส์ได้ด้วยเอนไซม์ PPO ได้แก่ สารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในพืชซึ่งเป็นสารฟลาโวนอยด์ เช่น แอนโทไซยานิน ลูโคแอนโทไซยานิน ฟลาโวนอล แคลทีคอล กรดคาเฟอิก กรดคลอโรจีนิก แคทีชิน เอสเทอร์ของกรดซินนามิก 3, 4-ไดไฮดรอกซีฟีนิลอะลาโนน และไทโรซีน พืชที่เหมาะสมสำหรับการทำงานเอนไซม์ PPO อยู่ในช่วงพีเอช 5 ถึง 7 เอนไซม์นี้ไม่ค่อยคงตัว ถูกทำลายได้ด้วยความร้อน และถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแอสไคด์ กรดฟีนอล ซัลไฟต์ คีเลติงเอเจนต์ และรีดิวซิงเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิก และ ซิสเตอีน เป็นต้น

ปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์เป็นปัญหาสำคัญในการแปรรูปผลไม้และผักหลายชนิด ได้แก่ แอปเปิล ท้อ สาลี่ กว๊าย องุ่น มันฝรั่ง เห็ด มะเขือ ผักสลัด ใบชา และเมล็ด

กาแฟ รวมทั้งอาหารทะเลบางชนิด เช่น กุ้ง ปู และกุ้งมังกร เมื่ออาหารเกิดสีน้ำตาลจะทำให้อายุการวางจำหน่ายสั้นลง และปฏิกิริยานี้ยังอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับผักและผลไม้ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งและแช่เยือกแข็งอีกด้วย

#### 2.4.2 การควบคุมและยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ในอาหาร

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ในอาหารทำให้อาหารมีสีเปลี่ยนไปและยังทำให้รสชาติของอาหารบางชนิดเปลี่ยนไปด้วย อาหารจึงมีคุณภาพลดลงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ทำได้หลายวิธี ซึ่งจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของอาหาร (นิริยา, 2545) เช่น

- ใช้ความร้อนทำลายเอนไซม์ PPO

เช่น การลวก วิธีนี้เหมาะสำหรับผักและผลไม้ที่ต้องการแปรรูป เช่น การให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาทีจะทำลายเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลหมด (จินตนา, 2534)

- ใช้สารเคมียับยั้งการทำงานของเอนไซม์ PPO

เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นสารเคมีที่ยับยั้งเอนไซม์ PPO ได้ดีที่สุด และเป็นการยับยั้งแบบถาวรไม่กลับคืน นิยมใช้กับผลไม้อบแห้ง เช่น ลูกเกด แต่มีข้อเสีย คือ ทำให้เกิดกลิ่นถ้าใช้มากเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และทำให้ผู้บริโภคบางคนเกิดอาการแพ้ได้ เช่น ทำให้เกิดอาการหอบหืด ดังนั้นคณะกรรมการอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้กำหนดปริมาณซัลไฟต์ที่ยอมให้มีได้ในผลิตภัณฑ์อาหาร และให้บ่งบอกไว้บนฉลากด้วย ปัจจุบันได้มีการศึกษาหาสารเคมีชนิดอื่นที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์

- เติมสารรีดิวซ์ซิงเอเจนต์ (reducing agents)

ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการใช้ไฮโดรเจนจึงทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากสารประกอบฟีนอลิกและช่วยลดการเกิดสารควิโนนทำให้ลดการเกิดสีน้ำตาลลงได้ เช่น กรดแอสคอร์บิกจะไปทำปฏิกิริยากับออร์โท-ควิโนนให้เปลี่ยนกลับไปเป็นออร์โท-ไดฟีนอล (Garcia and Barrett, 2002)

#### — กำจัดออกซิเจน

เพราะการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาการใช้เอนไซม์เกิดขึ้นได้เมื่อมีออกซิเจน เช่น การบรรจุผักกาดหั่นชิ้นภาชนะสุญญากาศสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ (ประสาน, 2538) นอกจากนี้ยังสามารถลดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้

การยับยั้งเอนไซม์อาจใช้ 2-3 วิธีร่วมกันได้ ได้แก่ การเติมสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์โดยใช้กรดแอสคอร์บิกร่วมกับการกำจัดออกซิเจนโดยการบรรจุอาหารในภาชนะสุญญากาศ หรือการลวก ร่วมกับการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และบรรจุอาหารในภาชนะสุญญากาศ แต่การลวกด้วยไอน้ำ ใช้กับผลไม้ไม่ได้ เพราะจะทำให้ผลไม้บางชนิดมีกลิ่นผิดปกติ และทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มลง อย่างไรก็ตามสามารถใช้ความร้อนยับยั้งเอนไซม์ในน้ำผลไม้และเนื้อผลไม้ตีปั่น และเอนไซม์ PPO จะถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ อุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ในการทำลายเอนไซม์ PPO และควรมีการศึกษาหาอุณหภูมิและ เวลาที่เหมาะสม ในการทำลายเอนไซม์ PPO หรือฟีนอลเอสในผักหรือผลไม้แต่ละชนิด และ ภายหลังการลวกแล้วต้องทำให้ผักหรือผลไม้เย็นลงอย่างรวดเร็วเพื่อรักษาคุณภาพของอาหารไว้ให้ ดีที่สุด

#### 2.4.3 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ ได้แก่ ปฏิกิริยามอลลาร์ด (maillard reaction) และการเกิดคาราเมลไลเซชัน (caramelization) จะเกิดขึ้นเมื่ออาหารได้รับความร้อน มีการสูญเสีย น้ำ มีการสลายตัวและมีการรวมตัวกันพัฒนาเป็นสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง มีกลิ่นและ รสชาติเฉพาะ ทำให้คุณค่าทางโภชนาการลดลง สำหรับอาหารบางชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำ ให้มีกลิ่น สี และรสชาติดีขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์นี้แบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

##### — ปฏิกิริยามอลลาร์ด

เมื่อน้ำตาลแอลโดสหรือคีโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อได้รับความร้อนในสภาวะที่มีน้ำ ( $a_w > 0.2$ ) กับเอมีนทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ทำให้มีผลต่อสี กลิ่น และรสชาติของอาหาร ปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้น ขณะทอด อบ ปิ้งย่าง หรือระหว่างเก็บรักษาอาหาร



#### – การแม่ไลเซชัน

การแม่ไลเซชัน เป็นการให้ความร้อนในการสลายโมเลกุลให้แยกออก และเกิดพอลิเมอร์ไลเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสีน้ำตาล ปฏิกริยานี้สารเริ่มต้นเป็นน้ำตาลเท่านั้น

### 2.5 เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ (vacuum impregnation, VI)

เทคโนโลยีกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์และมีประสิทธิภาพซึ่งได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการแปรรูปผักและผลไม้ โดยการใช้ระบบสุญญากาศร่วมกับระบบการแช่ มีผลทำให้สารละลายจากภายนอกซึมเข้าไปแทนที่น้ำหรืออากาศในรูพรุนของโครงสร้างเนื้อเยื่อของพืชได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ระบบสุญญากาศจะไปเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนมวลและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบางอย่างของสารอาหาร เทคนิคนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในขั้นตอนการเตรียมอาหารขั้นต้นก่อนที่จะทำการแปรรูปต่อไป เช่น การทอด การอบแห้ง การแช่เยือกแข็ง และการผลิตอาหารกระป๋อง ทั้งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปตัดแปลงสูตรและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งเทคนิคดังกล่าวน่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลของแอปเปิ้ลที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วย PEF ก่อนการทำแห้งแบบออสโมติกเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลได้

หน้าที่หลักของเทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ สามารถแบ่งได้ 2 ประเด็น ดังนี้

#### – เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์

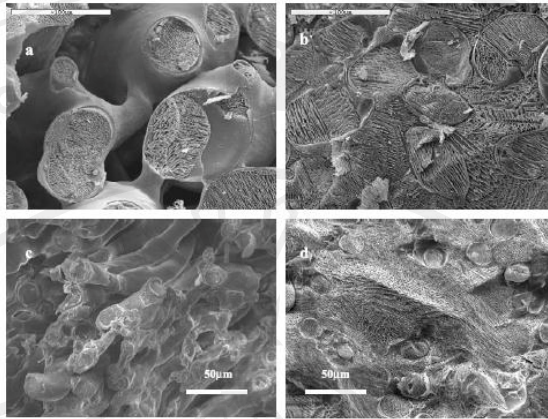
โดยปรับปรุงรูพรุนในโครงสร้างของอาหารให้ดีขึ้น ส่วนใหญ่นิยมใช้ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นในผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยอุณหภูมิต่ำหรือความร้อนซึ่งจะมีผลต่อการทำลายเนื้อเยื่อของพืช นอกจากนี้ เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศยังช่วยในเรื่องของการรักษาสี กลิ่น และรสของผลิตภัณฑ์ และช่วยป้องกันการสูญเสียคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อน เช่น การใช้น้ำตาล หรือน้ำเชื่อมร่วมกับระบบกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศจะช่วยป้องกันการสูญเสียกลิ่นในผลไม้สดได้ และยังพบว่าเทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศมีผลในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นผลไม้จากเอนไซม์และการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศยังช่วยให้สารอาหารอื่น ๆ ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สารที่ช่วย

ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์สามารถซึมผ่านเข้าไปในโครงสร้างของสารอาหาร ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีคุณภาพดีขึ้นและมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น (Gras *et al.*, 2002 และ Chiralt *et al.*, 2001)

— ช่วยประหยัดพลังงาน

โดยลดพลังงานและเวลาในการผลิต ซึ่งจากรายงานของ Zhao and Xie (2004) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซและของเหลว สำหรับเทคนิคต่างๆ คือ เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ เทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชัน และเทคนิคการเชื่อมและการดองเค็ม (candyng and salting) โดยมีผลลัพธ์ได้ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างสุดท้ายหลังจากผ่านแต่ละเทคนิค พบว่าเทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศจะให้ผลดีที่สุด คือ ใช้เวลาในการผลิตที่ต่ำกว่าโดยเวลาที่ใช้ไปจะมีหน่วยวัดเป็นนาที ในขณะที่เทคนิคออสโมติกดีไฮเดรชัน และ เทคนิคการเชื่อมและการดองเค็มจะมีหน่วยวัดเป็นชั่วโมง และวันหรือสัปดาห์ ตามลำดับ และเทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศมีอัตราการสูญเสียน้ำสูงที่สุดด้วย จากการที่เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศใช้หน่วยเวลาเป็นนาที ส่งผลให้ประหยัดพลังงานและใช้เวลาในการผลิตน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นข้างต้น

นอกจากนี้ Fito *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศต่อโครงสร้างอาหาร โดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซออกจากรูพรุนภายในเนื้อเยื่ออาหาร และการแทนที่ช่องว่างในรูพรุนดังกล่าวด้วยของเหลวจากภายนอก ดังแสดงในภาพ 2.7 อากาศจะเคลื่อนที่ออกจากรูขนาดเล็ก เมื่อปรับความดันสู่ปกติ (ความดันบรรยากาศ) สารละลายจะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างเซลล์โดยการซึมตามรูขนาดเล็ก (capillary) โดยเกรเดียนต์ความดัน (pressure gradients) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสารเคมีและคุณสมบัติบางอย่างของโครงสร้างอาหารในขั้นตอนของการทำแห้งและกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก พบว่า การควบคุมระยะเวลาในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ จะทำให้การแลกเปลี่ยนมวลของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ได้คาร์บอนิลผลผลิตของผลไม้มั้เข้มข้นมากขึ้น



ภาพ 2.7 แสดงถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Cryo-SEM ของเปลือกส้ม (a) และ (b) มะเขือ (c) และ (d) ลักษณะเซลล์ก่อน (a), (c) และหลัง (b), (d) แช่ในสารละลายไอโซโทนิก (isotonic solution) ร่วมกับ VI ผลไม้ที่มีช่องว่างระหว่างเซลล์มากจะทำให้สารละลายไอโซโทนิกแทรกเข้าอยู่ภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ได้มากกว่าหลังการการใช้ VI

ที่มา : ดัดแปลงจาก Fito (2001)

Gras *et al.* (2003) ทำการศึกษาผลของกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศต่อโครงสร้างอาหารโดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซออกจากรูพรุนภายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ โดยมีการศึกษาถึงผลของแคลเซียมต่อเนื้อเยื่อของผัก และผลของกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศต่อกลไกต่างๆที่เกิดขึ้น ซึ่งผักที่นำมาทำการทดลอง คือ มะเขือเปราะ เห็ดนางรมและแครอท สารละลายที่ใช้ในการแช่ประกอบด้วยซูโครสร่วมกับแคลเซียมแลคเตท และใช้สารละลายซูโครสเป็นตัวอย่างควบคุม โดยใช้ความดันที่ระดับ 50 มิลลิบาร์เป็นเวลานาน 10 นาที จากนั้นปรับความดันไว้ที่ระดับความดันบรรยากาศนาน 10 นาที จากการวิเคราะห์ผลของการดูดซึมสารละลายและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง พบว่า แคลเซียมมีผลต่อการดูดซึมสารละลายเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อกลไกภายในเนื้อเยื่อของมะเขือเปราะและแครอท นอกจากนี้แคลเซียมไม่มีผลต่อเห็ดนางรมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการตรวจสอบถึงระดับการดูดซึมแคลเซียมของเนื้อเยื่อของผักโดยวิธี Electron Dispersive X-ray Microanalysis (EDXMA) พบว่า แคลเซียมถูกดูดซึมเข้าไปในช่องว่างภายในเซลล์ของมะเขือเปราะและเห็ดนางรม และสามารถเข้าไปภายในไซเลมของแครอท อย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

Mujica-Paz *et al.* (2003) ทำการศึกษาถึงผลของความดันและเวลาที่มีต่อปริมาณการดูดซึมสารละลายของชิ้นผลไม้ ทั้ง 6 ชนิด ซึ่งได้แก่ มะม่วง แอปเปิ้ล กล้วย ท้อ แตงเมลอน และmamey โดยวิธีการสร้างพื้นที่การตอบสนองในรูปแบบของสมการยกกำลังสอง วิธีการทดลองจะเริ่มจาก

การนำขึ้นผลไม้แช่ในสารละลายซูโครส จากนั้นทำการผันแปรระดับของเวลาในการแช่ตั้งแต่ 3 ถึง 45 นาที และระดับของความดันที่ 135 ถึง 674 มิลลิบาร์ จากการทดลองพบว่าระดับความดันมีผลต่อปริมาณการดูดซึมสารละลายของขึ้นผลไม้อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.01$ ) นอกจากนี้ผลของการดูดซึมยังขึ้นกับระยะเวลาของกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.01$ ) เช่นกัน

Betoret *et al.* (2005) ได้ศึกษาถึงการแช่แอปเปิลในสารละลายที่มีส่วนผสมของแคลเซียมกลูโคเนตและไอร์ออนกลูโคเนต โดยผันแปรระดับปริมาณของแคลเซียมกลูโคเนตและไอร์ออนกลูโคเนตเท่ากับ 0 ถึง 114.7 และ 0 ถึง 2.98 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยคิดเป็นปริมาณธาตุแคลเซียมและเหล็กเท่ากับ 0 ถึง 14.917 และ 0 ถึง 0.336 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และใช้เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศในการแช่ตัวอย่างที่ความดัน 50 มิลลิบาร์ จากการตรวจสอบโดยวิธี EDXMA พบว่า แคลเซียมและเหล็กจะเคลื่อนที่จากสารละลายเข้าสู่เซลล์ของแอปเปิล ในชั้นของ intracellular space ซึ่งคิดเป็นปริมาณแคลเซียมและเหล็กในเนื้อแอปเปิลเท่ากับ 1.28 มิลลิกรัม แคลเซียมต่อกรัมตัวอย่าง และ 0.0287 มิลลิกรัมเหล็กต่อกรัมตัวอย่างตามลำดับ นอกจากนี้ การซึมผ่านแคลเซียมเข้าไปในเนื้อเยื่อเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเพื่อเพิ่มความคงตัวของอาหาร (Martín-Diana, 2007) หรือปรับปรุงสี เช่น การลดการเกิดสีน้ำตาลของผลไม้โดยการนำกรดแอสคอร์บิกเข้าไปในเซลล์เนื้อเยื่อ

Anino *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถของกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศในการเสริมแคลเซียมในขึ้นแอปเปิล โดยศึกษาเปรียบเทียบกับกระบวนการแช่ที่ความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศจะใช้ความดัน 30 มิลลิเมตรปรอทในการแช่แอปเปิล และใช้เวลานาน 10 นาทีเท่ากันทั้งสองกระบวนการ ผลการทดลองพบว่ากระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศสามารถช่วยให้แคลเซียมแทรกซึมเข้าไปในเนื้อแอปเปิลได้ดีกว่ากระบวนการแช่ที่ความดันบรรยากาศในเวลาเท่ากัน โดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 30 ของปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับผู้ใหญ่ (adequate intake) สำหรับงานวิจัยที่ได้นำกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศมาใช้กับตัวอย่างประเภทอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กลุ่มผักและผลไม้ เช่น การศึกษาของ Hofmeister *et al.* (2005) ซึ่งทำการศึกษากระบวนการผลิต minas cheese (เป็นเนยแข็งชนิดหนึ่งของประเทศบราซิล) โดยประยุกต์ใช้ระบบกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศในขั้นตอนของการแช่สารละลายเกลือ หลังจากนั้น minas cheese จะถูกนำมาประเมินความเข้มข้นของเกลือโดยวิธีการผสมสีย้อม (dye) ในสารละลายเกลือและลักษณะทางกายภาพโดยการถ่ายภาพของเนื้อเนยแข็ง จากผลการศึกษาพบว่าสารละลายเกลือสามารถแทรกซึมและรวมตัว

เป็นเนื้อเดียวกันกับ minas cheese ได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเดิมและเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพพบว่า โครงสร้างของ minas cheese จะมีความสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น อีกทั้งรطوبةภายในเนื้อ minas cheese ก็มีขนาดลดลงซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีขึ้นกว่าเนยแข็งปกติ

นอกจากนั้นกระบวนการแช่ตัวอย่างในสารละลายไอโซโทนิคโดยใช้สภาวะสุญญากาศ ทำให้เกิดกลไก hydrodynamic mechanism (HDM) กล่าวคือ เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายเข้าสู่ช่องว่างระหว่างเซลล์ โดยช่องว่างนี้เกิดจากการที่อากาศในเซลล์ที่ถูกดูดออกไประหว่างการใช้สภาวะสุญญากาศ กล่าวได้ว่า HDM เป็นกลไกที่ช่วยในการนำสารละลายเข้าสู่เซลล์นั่นเอง (Fitto *et al.*, 1997) จากการรายงานของ Fitto (1997) กล่าวว่า การแช่ชิ้นผักหรือผลไม้ในสารละลาย physiologically active components (PAC) โดยใช้เทคนิค VI สามารถเสริม PAC ให้กับผักหรือผลไม้ได้ โดยอากาศในช่องว่างระหว่างเซลล์จะถูกขับออกมา และหลังจากแช่ต่อที่สภาวะบรรยากาศสารละลายภายนอกซึ่งประกอบด้วย PAC จะซึมผ่านเข้าไปแทนที่อากาศที่ถูกขับออกจากช่องว่างระหว่างเซลล์โดยใช้หลักการของ capillary action และเกรเดียนต์ความดัน

## 2.6 การทำแห้ง (มาลัยวรรณและคณะ, 2545; วิไล, 2545)

การทำแห้ง หรือการคังน้ำออก เป็นกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อกำจัดความชื้นออกจากอาหารด้วยการระเหยน้ำ โดยอาศัยความร้อนแฝงของการระเหย การทำแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่นิยมใช้กันมานาน โดยวิธีการดั้งเดิมคือการนำอาหารไปตากแดดจนอาหารนั้นแห้ง สามารถเก็บไว้ได้นาน การทำแห้งเป็นการกระทำโดยการลดความชื้นของอาหารด้วยการระเหยน้ำออกจากผิวของ อาหาร ปัจจุบันการทำแห้งถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญในระดับอุตสาหกรรม มีผลิตภัณฑ์จำนวนมากที่มาจากการทำแห้ง

วัตถุประสงค์ของการทำแห้งอาหาร คือ ยืดอายุการเก็บรักษา โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำแห้งจะมีปริมาณน้ำหรือความชื้นประมาณ 2-14 เปอร์เซ็นต์ ทำให้  $a_w$  ในอาหารลดลงไปด้วย เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ทุกชนิด เช่น รา (mold) ยีสต์ (yeast) แบคทีเรีย (bacteria) ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมีซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบและเป็นเหตุให้อาหารเน่าเสีย การทำแห้งจึงทำให้อาหารมีความปลอดภัย เนื่องจากการลดปริมาณน้ำในอาหารโดยการทำแห้ง ทำให้อาหารมีค่า  $a_w$  น้อยกว่า 0.6 ซึ่งเป็นระดับที่จุลินทรีย์ก่อโรค ไม่สามารถเจริญได้ รวมทั้งยังสามารถยับยั้งสารพิษของเชื้อรา เช่น aflatoxin

นอกจากนี้การทำแห้งยังเป็นการทำเพื่อให้อาหารมีน้ำหนักมาลดปริมาตร ทำให้สะดวกต่อการขนส่ง การบริโภค หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปต่อเนื่องด้วยวิธีอื่น อีกทั้งยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ซึ่งคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงพื้นฐานการทำแห้งเป็นอย่างดี

### 2.6.1 หลักการทำแห้ง

กระบวนการทำแห้งส่วนมากใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผลิตภัณฑ์และการถ่ายเทมวลความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ ความร้อนจากอากาศที่ผลิตภัณฑ์ได้รับไปจะถูกใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีชีวิต เช่น เมล็ดพืชส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะของชั้นบางที่สภาวะอากาศคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมร้อน) โดยอาศัยหลักการดังนี้

#### 2.6.1.1 การถ่ายเทความร้อน แบ่งออกเป็น

- การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง สภาพนำความร้อน เป็นคุณสมบัติของสารที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัตถุซึ่งจะมีค่าแตกต่างกัน สภาพนำความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิและความร้อน ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำจะมีค่ามากกว่าค่าของวัตถุแห้งที่เป็นอาหาร ซึ่งจะเกิดอาหารที่ลักษณะเป็นของแข็ง
- การพาความร้อน จะเกิดกับอาหารที่เป็นของเหลวโดยกระแสความร้อนจะถูกพาผ่านช่องว่างที่เป็นอากาศหรือแก๊สจากของเหลวชนิดหนึ่งไปยังของเหลวอีกชนิดหนึ่ง
- การแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนไปยังอาหาร

#### 2.6.1.2 สภาวะการทำแห้ง สามารถจำแนกได้ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

— การทำแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศด้วยอากาศร้อน และเครื่องทำแห้งชนิดสัมผัสความร้อนจะถูกถ่ายโอนเข้าไปในอาหารจากลมร้อน หรือผิวสัมผัสร้อน แล้วน้ำจะถูกดึงออกไปด้วยอากาศที่ไม่อิ่มตัว เช่น การทำแห้งด้วยลมร้อน

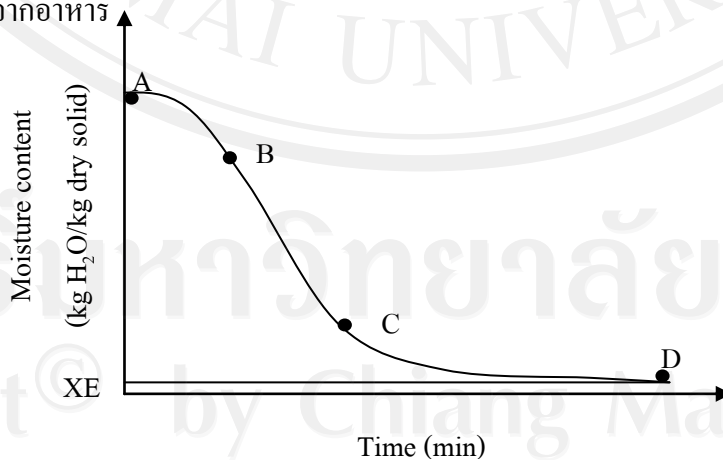
— การทำแห้งภายใต้สุญญากาศ เป็นการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดภายใต้ความดันบรรยากาศ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นมักเกิดแบบการพาความร้อน โดยการใช้ความร้อนเป็นตัวพาความร้อนไปยังชั้นอาหาร ข้อดีของการทำแห้งภายใต้สุญญากาศ คือเกิดการดึงน้ำออกได้อย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จะมีคุณภาพดี แต่กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่าย

ในการติดตั้งและดำเนินกระบวนการสูง จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีมูลค่าสูงหรือผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการให้มีความชื้นต่ำโดยไม่เกิดการทำลายของตัวผลิตภัณฑ์อาหาร

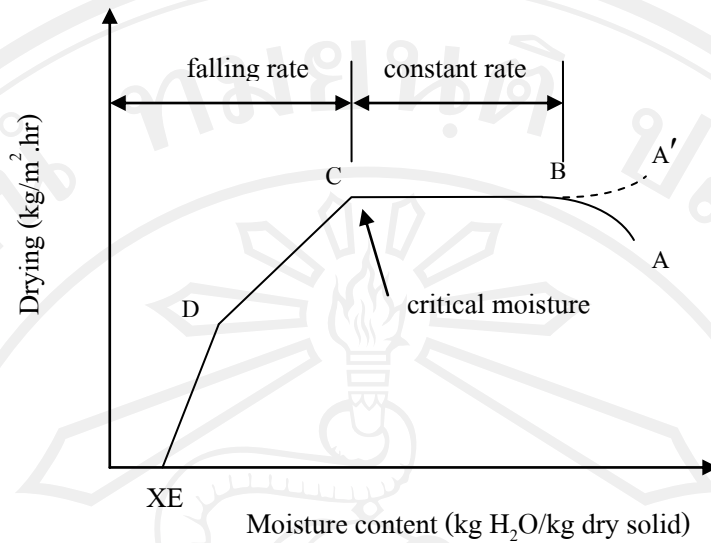
— การทำแห้งแบบเยือกแข็ง แตกต่างจาก 2 วิธีแรก คือ ในการทำแห้งทั่วไปจะใช้ความร้อนในการทำให้น้ำในอาหารระเหยเป็นไอ แต่ในกระบวนการนี้น้ำจะระเหยออกจากอาหารด้วยการระเหิดน้ำเป็นไอ ดังนั้นจึงไม่มีการเคลื่อนที่ของน้ำจากกึ่งกลางขึ้นไปยังผิวหน้า ในระหว่างกระบวนการระเหิดชั้นน้ำแข็งจะลดลงจากผิวหน้าไปหาจุดกึ่งกลางที่เหลือแต่ช่องว่างเดิมที่เคยมีน้ำแข็งแทรกอยู่ ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถรักษากลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการได้ดีมาก เกิดการทำลายโครงสร้างและเนื้อสัมผัสน้อยมาก เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สี และลักษณะภายนอกน้อย เกิดโพรงในโครงสร้างทำให้เกิดการดูดน้ำกลับได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ สำหรับข้อเสียของวิธีนี้คือลงทุนสูง ใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการทำแห้งจำเป็นต้องทำการหั่นเป็นชิ้นลูกเต๋า หรือเป็นแผ่นเพื่อทำให้อาหารแห้ง ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำเป็นต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษเพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับ และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

## 2.6.2 กลไกการทำแห้ง

เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ใอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสองและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไอน้ำออกจากอาหาร



(a)



(b)

ภาพ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานแห้งกับเวลาทำแห้ง (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทำแห้ง และความชื้น (b) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงการปรับสถานะเบื้องต้น (initial adjustment period, AB) เป็นช่วงที่ความชื้นที่มีอยู่ในอาหารปรับตัวเพื่อมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อน อัตราการทำแห้งจะต่ำและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงช่วงที่อัตราการทำแห้งคงที่ จากภาพ 2.8 คือ ช่วง AB ซึ่งถือว่าเป็นช่วงสั้นๆ สามารถตัดทิ้งได้เมื่อคำนวณเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ส่วนช่วง A'B' เป็นกรณีที่มีบริเวณผิวหน้าของแข็งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหยในตอนแรกจะสูงและค่อยๆ ลดลงจนคงที่
- ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period, BC) เป็นช่วงที่น้ำในอาหารระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่อง คล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป
- ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period, CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมอ อัตราการทำแห้งจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสมดุล ซึ่งน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก



### 2.6.3 อัตราการทำแห้ง

อัตราการทำแห้งของอาหาร ขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหารเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง และสถานะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน เป็นต้น

อัตราการทำแห้ง คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา สมการของอัตราการทำแห้ง สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.1

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R$  คือ อัตราการทำแห้งหรืออัตราการระเหย (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$A$  คือ พื้นที่ที่เกิดการระเหย (ตารางเมตร)

$\frac{dm}{dt}$  คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

ความสัมพันธ์ของมวลของน้ำในอาหารและความชื้นในอาหาร สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.2

$$m = WM \quad \text{และ} \quad M = I A \rho_s$$

$$dm = M dW = I A \rho_s dW \quad (2.2)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของน้ำในสารชิ้น (กิโลกรัม)

$M$  คือ มวลของสารแห้งสนิท (กิโลกรัม)

$W$  คือ ความชื้นในอาหาร (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมแห้ง)

$I$  คือ ความหนาของสารแห้งสนิท (เมตร)

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของสารแห้งสนิท (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

#### 2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำแห้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งและอัตราการทำแห้ง ได้แก่

##### ก. โครงสร้างของอาหาร

อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน จะมีการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ได้เร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารที่มีรูพรุนจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารที่มีรูพรุนน้อย ทำให้มีอัตราการทำแห้งสูง และอาหารที่ผ่านการลวก การลวกจะทำให้ลดระยะเวลาในการทำแห้ง กำจัดอากาศที่อยู่ระหว่างเซลล์ ทำให้เนื้อสัมผัสนุ่มลง ป้องกันการเกิดกลิ่นที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา รักษาปริมาณแคโรทีนและวิตามินซีของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา แต่ผลไม้ที่ผ่านการลวกมักมีสีคล้ำกว่าการใช้วิธีการอื่นๆ อาจทำให้เกิดกลิ่นสุก และเนื้อสัมผัสอาจนุ่มและดำเนินกระบวนการต่อไปได้ยาก หรือการผ่านด้วย PEF เป็นการทำให้เซลล์แตกก่อนการนำไปทำแห้งจะทำให้อาหารแห้งเร็วยิ่งขึ้น

##### ข. ขนาดและรูปร่างของอาหาร

ขนาดและรูปร่างของอาหารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อการทำแห้ง มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก คืออาหารที่มีรูปร่างเหมือนกัน ชิ้นที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าจะใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าอาหารที่มีชิ้นขนาดใหญ่ แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ แต่ถ้าอาหารชิ้นเล็กมากมีการวางทับกัน การระเหยจะเกิดขึ้นได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศจึงเกิดช้าต่างๆ ที่มีพื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนัก แต่มีอาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมาก จะมีอัตราการทำแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นการอาหารที่มีความหนามากอัตราการทำแห้งจะช้ากว่าอาหารที่หนาน้อยกว่าเนื่องจาก อัตราการทำให้แห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

##### ค. ปริมาณของอาหารที่นำมาทำแห้ง

อาหารที่นำมาทำแห้งในปริมาณมากๆ จะมีอัตราการทำแห้งที่ช้าเนื่องจาก อากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารที่นำมาทำแห้งได้อย่างทั่วถึงจึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้ จึงทำให้อัตราการทำให้แห้งช้าลง

### ง. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ

ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้น จึงมีผลต่อการอบในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงด้วย

หากอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ น้ำจะสามารถระเหยกลายเป็นไอได้มากและเร็ว จะทำให้อุณหภูมิของกระเปาะเปียกต่ำกว่าอุณหภูมิของกระเปาะแห้งมาก ทำให้อาหารแห้งเร็วขึ้น แต่ถ้าอากาศมีความชื้นในอากาศสูง อัตราการระเหยการเป็นไอของน้ำของกระเปาะเปียกจะน้อยลง ทำให้การทำแห้งเป็นไปได้ช้า ทำให้น้ำพาความร้อนออกไปได้น้อยลง และเมื่อใดที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ อัตราการระเหยของน้ำในกระเปาะเปียกจะเป็นศูนย์ด้วย ทำให้ไม่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งทั้งสอง

ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไป เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะเคลื่อนย้ายไอน้ำได้ดีขึ้น นอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตา อากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

อากาศที่จะใช้ทำแห้งควรมีความชื้นต่ำอาจทำได้โดยการผ่านอากาศเข้าไปในฮีทเตอร์ก่อนเข้าไปในเครื่องทำแห้งหลังการทำแห้ง ความชื้นจำเพาะของอากาศก็จะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอากาศเป็นตัวกลางในการพาน้ำในอาหาร จะทำให้เวลาการทำแห้งลดลง

### จ. ความดัน

เกี่ยวข้องกับการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากในที่มีความดันต่ำๆ ลงมาทำให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง น้ำจึงสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ไอน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ทำให้ความดันภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น และความแตกต่างระหว่างความดันภายในกับภายนอกผลิตภัณฑ์จะเป็นแรงผลักดันให้น้ำในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ออกไปภายนอกได้เร็วขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งลงและเพิ่มอัตราการทำแห้งขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้ผลิตภัณฑ์จึงสามารถทำให้แห้งได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงจึงเป็นการลดอุณหภูมิของกระบวนการทำแห้ง นอกจากนั้นการที่ระบบเป็นสุญญากาศจึงมีปริมาณออกซิเจนต่ำมากในระหว่างการทำแห้ง สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ จึงช่วยรักษาสีและคุณค่าทางโภชนาการได้

### 2.6.5 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการทำแห้ง

การเปลี่ยนแปลงของอาหารมากหรือน้อยเกิดจากธรรมชาติของอาหารและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้ง (รัตน และพิไลรัก, 2541; สุกนชื่น, 2543) ดังนี้

#### ก. การหดตัว

การเสียน้ำทำให้เซลล์อาหารเกิดการหดตัวจากภายนอก ซึ่งการหดตัวของเซลล์อาหารนี้สามารถหดเข้าไปได้ทุกส่วน ส่วนที่แข็งสามารถคงสภาพไว้ได้ ส่วนที่อ่อนจะเว้าเข้าไป อาหารที่หดตัวจะทำให้มีพื้นที่ผิวในระเหยความชื้นออกจากอาหารลดลง อาหารที่มีน้ำมากจะเกิดการบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งอย่างรวดเร็วจะเกิดการหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งช้าๆ

#### ข. การเปลี่ยนสี

อาหารที่ผ่านการทำแห้งมักมีสีเข้มขึ้น เนื่องจากความร้อนหรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล อุณหภูมิและช่วงเวลาที่อาหารมีความชื้นร้อยละ 10-20 มีผลต่อความเข้มของสี

#### ค. การเกิดเปลือกแข็งที่ผิวหน้าอาหาร

เป็นลักษณะที่ผิวอาหารแข็งเป็นเปลือกหุ้มส่วนในที่ยังไม่แห้งไว้ เนื่องจากน้ำระเหยออกในช่วงแรกเร็วเกินไป น้ำจากด้านในเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทันการทำแห้ง หรือมีสารละลายน้ำตาล โปรตีน เคลื่อนที่มาแข็งตัวที่ผิว สามารถแก้ไขได้โดยใช้อุณหภูมิต่ำและใช้อากาศที่มีความชื้นสูงเพื่อไม่ให้ผิวหน้าของอาหารแห้งเร็วเกินไป

#### ง. การเสียความสามารถในการคืนสภาพ

อาหารแห้งบางชนิดต้องนำมาคืนสภาพ แต่การคืนสภาพไม่สามารถทำให้มีรูปร่างเหมือนเดิมได้ เนื่องจากอาหารที่ผ่านการทำแห้งแล้วเซลล์อาหารเสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ สตาร์ชและโปรตีนเสียความสามารถในการดูดน้ำ อาหารที่ทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็งจะมีความสามารถในการคืนสภาพได้ดีกว่าเนื่องจากไม่ได้ใช้ความร้อนที่ทำลายผนังเซลล์ สตาร์ชและโปรตีนจึงไม่เสียสภาพ

#### จ. การเสียคุณค่าสารอาหารและกลิ่น

เกิดการเสื่อมสลายของวิตามินซี และแคโรทีนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไรโบฟลาวินจากแสง ไทอามีนจากความร้อน คือ เมื่อใช้เวลาในการทำแห้งนานยิ่งขึ้นจะทำให้สูญเสียคุณค่าทาง

อาหารมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ความร้อนยังทำให้โปรตีนสูญเสียไปบางส่วน รวมถึงกลิ่นในระหว่างการทำแห้งอาหารที่ใช้อุณหภูมิสูงทำให้กลิ่นลดลงหรือแตกต่างไปจากเดิม

#### 2.6.6 การทำแห้งด้วยลมร้อน

ทำได้โดยใช้ตู้อบขนาดใหญ่ที่มีลมร้อนที่ผ่านการให้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อนเป่าผ่านอาหารทำให้น้ำระเหยไปกับลมร้อนโดยทางช่องระบายลมภายในตู้อบ โดยนิยมใช้อุณหภูมิทำแห้งประมาณ 45 ถึง 65 องศาเซลเซียส (Ahmed *et. al.*, 2001)

วิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน เป็นวิธีที่ถูกปรับปรุงขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้แสงอาทิตย์ โดยการใช้อุปกรณ์ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งตามต้องการและมีความชื้นสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งด้วยวิธีนี้จะมีความสะอาดและลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ การทำแห้งด้วยลมร้อนที่นิยมใช้กับ เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ คือ การใช้ตู้อบลมร้อน และตู้อบแบบอุโมงค์ โดยการตากอาหารในตู้ขนาดใหญ่ซึ่งมีลมร้อนเป่าผ่านจึงสามารถระเหยน้ำออกไปกับลมร้อน และปล่อยออกทางช่องระบายลมภายในตู้อบโดยใช้อุณหภูมิในการทำแห้งประมาณ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส (อิมเอิบ, 2006)

เครื่องอบลมร้อนแบบถาด เป็นเครื่องมือทำแห้งลมร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำงานที่ความดันบรรยากาศ ลักษณะของเครื่องมือจะเป็นตู้ขนาดยาว มีถาดสำหรับใส่อาหารแต่ละถาดบรรจุขึ้นอาหารขนาดไม่เกิน 1 ถึง 6 เซนติเมตร (Ramaswamy and Mrcotte, 2006) โดยอากาศร้อนหมุนเวียนในตู้ที่ความเร็วลม 0.5 ถึง 5 เมตรต่อวินาทีต่อตารางเมตร ของพื้นที่ผิวของถาด มีระบบท่อเพื่อนำความร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องนำความร้อนเพิ่มขึ้นด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้ง (วิไล, 2546) ส่วนปัญหาเครื่องทำแห้งที่พบคือ ควบคุมดูแลยากจึงมีการทำแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายลมไม่ทั่วถึง มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่อยู่บริเวณทางเข้าของลมมีลักษณะแห้งกว่าด้านทางออกของลม ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่มีความสม่ำเสมอกัน สามารถแก้ไขได้โดยสลับถาดหรือกลับทิศทางลม

ข้อดีของการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาด คือ เสียค่าใช้จ่ายในการสร้างและบำรุงรักษาต่ำและมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง จึงนิยมใช้ในกระบวนการผลิตขนาดเล็กหรือในโรงงานขนาดเล็ก เนื่องจากการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาดเป็นการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้สำหรับพาความร้อนออกจากอาหารค่อนข้างสูง ดังนั้น

คุณสมบัติของวัตถุดิบที่เหมาะสมจึงเป็นประเภทที่ไม่ไวต่อความร้อนและเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ราคาไม่แพง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าการตลาด

## 2.7 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (water activity; $a_w$ )

### 2.7.1 ค่า $a_w$ กับความคงตัวของอาหาร

ค่า  $a_w$  เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในอาหาร ได้แก่ ปฏิกิริยาเคมี การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ การเปลี่ยนแปลงและความคงตัวของอาหารมีความสัมพันธ์กับค่าวอเตอร์แอกติวิตี้มากกว่าปริมาณความชื้น (Fennema, 1981) ค่า  $a_w$  ของอาหารมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหาร ( $p$ ) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ( $p_0$ ) ที่อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าตั้งแต่ 0-1 และมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (ERH; equilibrium relative humidity) ดังสมการ 2.3

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\text{ERH}(\%)}{100} \quad (2.3)$$

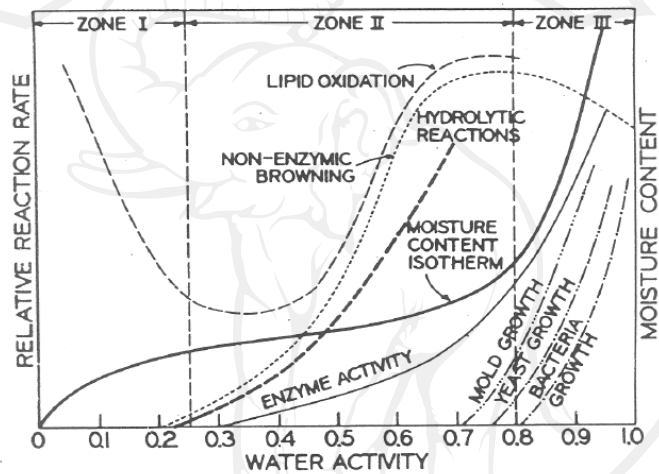
### 2.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $a_w$ กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี

$a_w$  มีผลกระทบต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาทางเคมีหลายชนิดที่เกิดขึ้นในอาหาร และอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ด้วย ซึ่งจะสัมพันธ์กับชนิดของน้ำในอาหาร ดังแสดงตามภาพ 2.9 และตาราง 2.2

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในอาหารซึ่งเป็นเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ จะเป็นปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์จะไม่เกิดขึ้นในอาหารที่มีน้ำชนิด monolayer water (ตาราง 2.2) ซึ่งมีค่า  $a_w$  ระหว่าง 0 ถึง 0.3 รวมทั้งจุลินทรีย์ต่างๆ ก็ไม่สามารถเจริญได้ จึงทำให้อาหารมีความคงตัวสูงและเก็บรักษาได้นาน

ดังนั้น การลดปริมาณน้ำในอาหารให้เหลือน้อยที่สุด หรือลดค่า  $a_w$  ให้ต่ำที่สุด จึงเป็นวิธีถนอมอาหารให้เก็บรักษาได้นาน กระบวนการที่ใช้ลดปริมาณน้ำและ  $a_w$  ได้แก่ การทำแห้ง และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

จากตาราง 2.2 สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ จะไม่เกิดขึ้นเมื่อ  $a_w$  มีค่าต่ำกว่า 0.25 ซึ่งตรงกันข้ามกับอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเริ่มสูงขึ้นเมื่อ  $a_w$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.4 และจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถึงจุดสูงสุดเมื่อ  $a_w$  เป็น 0.8 (ภาพ 2.9) เพราะความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นช่วยทำให้เอนไซม์และสับสเตรตเคลื่อนย้ายได้ง่าย ดังนั้น  $a_w$  จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อคุณภาพ อายุการเก็บรักษาและลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร



ภาพ 2.9 อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอาหาร และการเจริญของจุลินทรีย์ที่ผันแปรตามค่า  $a_w$  ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ที่มา : ดัดแปลงจาก Fennema (1975)

อาหารแห้งที่มีปริมาณน้อยเป็น monolayer water (ตาราง 2.2) เมื่อได้รับความชื้นเพิ่มขึ้น จะเปลี่ยนเป็น multilayer adsorption และดูดซับเข้าไปในรูเล็กๆ และช่องว่าง capillary ทำให้เกิดการละลายของตัวถูกละลายได้ น้ำจะถูกจับอยู่ในอาหารโดยทางกล ทำให้อาหารมีค่า  $a_w$  เพิ่มขึ้น

ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ส่วนใหญ่จะถูกยับยั้ง เมื่อมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.85 เช่น เอนไซม์อะไมเลส ฟีนอลออกซิเดส และเพอร์ออกซิเดส แต่เอนไซม์ไลเปสสามารถทำงานเร่งปฏิกิริยาได้ ถึงแม้  $a_w$  จะลดต่ำลงเป็น 0.3 ก็ตาม น้ำมันสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ที่  $a_w$  ต่ำประมาณ 0.15 ขณะที่ไขมันถูกไฮโดรไลซ์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตาราง 2.2 อัตราเร็วของปฏิกิริยาและการเจริญของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในอาหารตามชนิดของน้ำและค่า  $a_w$  ที่มีอยู่ในอาหาร

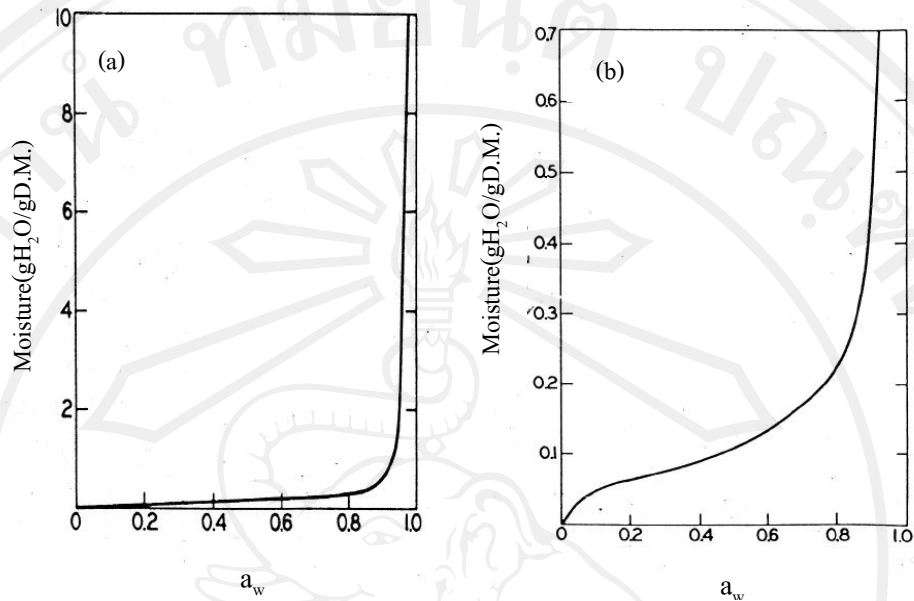
ปฏิกิริยาและการเจริญของจุลินทรีย์	monolayer water $a_w = 0-0.3$	capillary water $a_w = 0.3-0.8$	loosely bound water $a_w = 0.8-1.0$
enzymatic activity	0	ต่ำ	สูง
non-enzymatic browning	0	เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	สูง
การไฮโดรไลซิส	0	เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	สูง
ลิพิดออกซิเดชัน	สูง	เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	สูง
การเจริญของรา	0	ต่ำ*	สูง
การเจริญของยีสต์	0	ต่ำ*	สูง
การเจริญของแบคทีเรีย	0	0	สูง

\* การเจริญของราและยีสต์จะเริ่มเมื่อมีค่า  $a_w$  ประมาณ 0.7

ที่มา : ดัดแปลงจาก DeMan (1990)

สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ ก็เป็นปฏิกิริยาสำคัญที่มีผลทำให้เกิดการเน่าเสียของอาหารได้ และปฏิกิริยาการเกิดสูงสุดในช่วง  $a_w$  ประมาณ 0.6 ถึง 0.8 เช่น ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในนมผงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า  $a_w$  สูงขึ้น และมีจุดสูงสุดเมื่อ  $a_w$  มีค่า 0.65 หลังจากนั้นถึงแม้ค่า  $a_w$  จะเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลก็จะลดลง ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในนมผงและอาหารที่มีโปรตีนจะมีผลทำให้สูญเสียกรดอะมิโนไลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นต่อร่างกาย จึงทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลงด้วย ปริมาณความชื้นกับค่า  $a_w$  ของอาหารมีความสัมพันธ์กันดังภาพ 2.10 ในช่วงที่อาหารมีปริมาณความชื้นสูง ภาพ 2.10 (a) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $a_w$  เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ช่วงปริมาณความชื้นต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 50) ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $a_w$  ดังแสดงตามภาพ 2.10 (b) (Fennema, 1975; Belitz and Grosch, 1999)

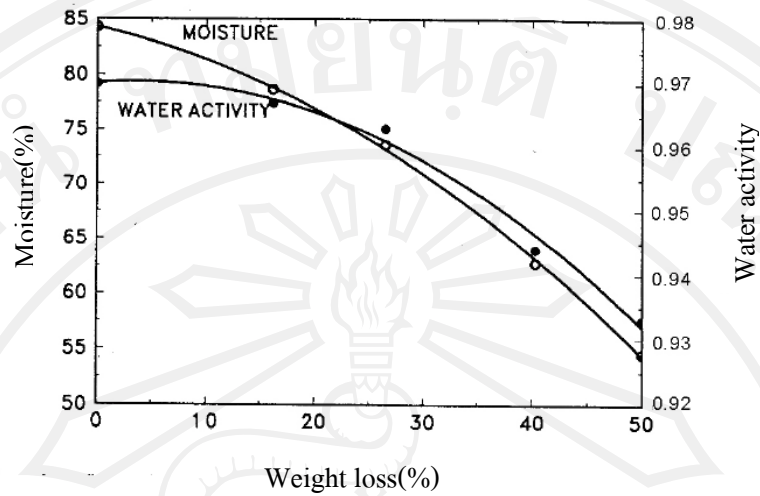




ภาพ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $a_w$  ของอาหารและปริมาณความชื้น (Moisture sorption isotherm) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (a) การเปลี่ยนแปลงค่า  $a_w$  ที่ช่วงความชื้นสูง (b) การเปลี่ยนแปลงค่า  $a_w$  ที่ช่วงความชื้นต่ำ

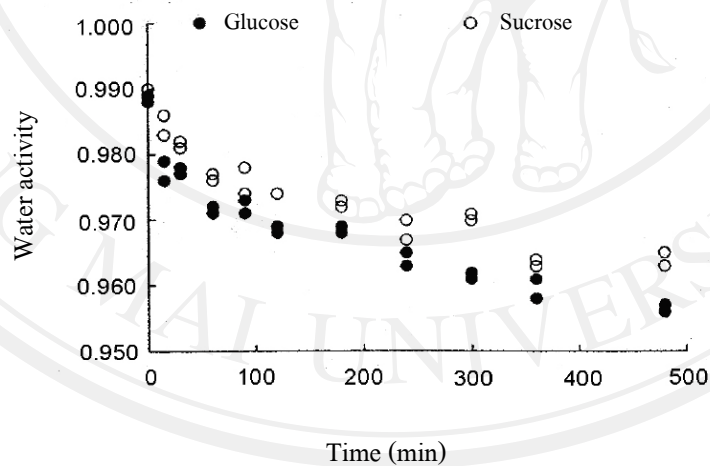
ที่มา : ดัดแปลงจาก Fennema (1975)

Bolin and Huxsoll (1993) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า  $a_w$  และปริมาณความชื้นของผลไม้ที่ผ่านการออสโมซิส พบว่า ลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณความชื้น และค่า  $a_w$  ลดลง จากภาพ 2.11 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นที่ลดลงในช่วงแรก จากร้อยละ 85 เป็นร้อยละ 80 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $a_w$  เพียงเล็กน้อย โดยมีค่า  $a_w$  ประมาณ 0.97 แต่เมื่อปริมาณความชื้นลดลงเพิ่มขึ้น ค่า  $a_w$  มีแนวโน้มลดลงมากขึ้น โดยเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น ส่วน Monsalve *et al.* (1993) พบว่า การเปลี่ยนแปลง  $a_w$  ของแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสมีแนวโน้มลดลงมากกว่า น้ำตาลซูโครส (ภาพ 2.12) โดยตัวอย่างแอปเปิ้ลที่แช่ในสารละลายกลูโคส และซูโครสมีปริมาณน้ำที่สูงใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของแข็งที่ได้รับเมื่อแช่ในสารละลายกลูโคสมากกว่าการแช่ในสารละลายซูโครส



ภาพ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่า  $a_w$  ของชั้นลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Bolin and Huxsoll (1993)



ภาพ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของค่า  $a_w$  ของแอปเปิลในระหว่างการออสโมซิสด้วยสารละลายกลูโคส (41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และสารละลายซูโครส (52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ที่มา : ดัดแปลงจาก Monsalve (1993)

นอกจากค่า  $a_w$  จะบ่งชี้ถึงความคงตัวระหว่างการรักษาผลิตภัณฑ์ต่อปฏิกิริยาการเสื่อมเสียต่างๆ แล้ว ปริมาณความชื้นสมดุลยังเป็นขีดจำกัดขั้นต่ำของความแตกต่าง ในการกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ และสามารถทำนายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้ปริมาณความชื้นสมดุลที่ต่ำลง

### 2.7.3 ผลของ $a_w$ ต่อปฏิกิริยาเคมีในอาหาร

ค่า  $a_w$  มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในอาหารมีหลายชนิด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่ออาหารส่วนมากเกิดจากปฏิกิริยาที่เอนไซม์เป็นตัวเร่ง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะไม่เกิดขึ้นเมื่อในอาหารมีค่า  $a_w$  ในช่วง 0 ถึง 0.2 รวมถึงจุลินทรีย์ก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ จะไม่เกิดขึ้นเมื่อมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.25 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาสูงสุดในช่วง 0.6 ถึง 0.8 เนื่องจากความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้เอนไซม์และสับสเตรดเคลื่อนย้ายได้ง่าย ดังนั้น การลดปริมาณน้ำให้เหลือน้อยลงที่สุด หรือการลดค่า  $a_w$  ต่ำลงทำให้อาหารมีความคงตัวสูงและ เก็บรักษาได้นานขึ้น ตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาลิพิดออกซิเดชัน เริ่มสูงขึ้นเมื่อค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.4 และจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถึงจุดสูงสุดเมื่อค่า  $a_w$  เป็น 0.8 การเกิดลิพิดออกซิเดชันจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากลิพิดไม่ละลายในน้ำ

## 2.8 ความชื้น (moisture content)

ความชื้น คือ เป็นค่าที่บอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของอาหาร เนื่องจาก

- ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร โดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ ซึ่งกระทบต่ออายุการเก็บ อาหารที่มีความชื้นน้ำสูง จะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย เนื่องจากเหมาะกับการเจริญเติบโตมีจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา
- ความชื้นมีผลต่อความปลอดภัยทางอาหาร อาหารที่มีน้ำสูงเหมาะกับการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรคและการสร้างสารพิษ ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ รวมถึงการสร้างสารพิษของรา เช่น aflatoxin, patulin ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค
- ความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่างๆ ของอาหาร เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน

- ความชื้นมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของอาหาร ได้แก่ เนื้อสัมผัส เช่น ความกรอบ ความเหนียว การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking)
- ความชื้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด

### 2.8.1 การแสดงค่าความชื้นของอาหาร

ปริมาณความชื้น นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 รูปแบบคือ

- ความชื้นมาตรฐานฐานเปียก (wet basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ชื้น โดยมีสมการดังนี้

$$M_w = \left[ \frac{(w-d)}{w} \right] \times 100 \quad (2.4)$$

- ความชื้นมาตรฐานฐานแห้ง (dry basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง โดยมีสมการดังนี้

$$M_d = \left[ \frac{(w-d)}{d} \right] \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก

$M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$w$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

$d$  คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง